

Предложена методика расчета, позволяющая определить следующие важнейшие параметры и элементы полупроводниковых аппаратов: номинальный ток, номинальный рабочий ток, типы тиристоров, циклоустойчивость этих тиристоров, а также перегрузочную способность по току аппарата.

УДК 621.316

А.Г. Сосков, д-р техн.наук,
П.Н. Алаев,
Н.О. Рак,
 Харьковская национальная академия городского хозяйства
И.А. Соскова, канд. техн. наук
 Украинская инженерно-педагогическая академия

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА МОЩНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ СИЛОВЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ

Введение. В [1] показано, что длительное воздействие токовой нагрузки на мощные управляемые полупроводниковые приборы (УПП) силовых коммутационных полупроводниковых аппаратов (КПА) имеет место для временных промежутков, начиная с десятых долей секунды и выше. Поэтому УПП под воздействием указанной нагрузки могут находиться во всех основных режимах работы силовых КПА:

- а) продолжительном;
- б) продолжительном с последующей кратковременной перегрузкой;
- в) кратковременном;
- г) повторно-кратковременном.

Нагрузочная способность УПП в этих режимах так же, как и при воздействии импульса тока, определяется максимально допустимой температурой полупроводниковой структуры (перехода), которая не должна быть превышена в любых режимах работы прибора.

Расчет температуры структуры производится графо-аналитическим методом по известным значениям мощности потерь и теплового сопротивления, которое в рассматриваемом временном диапазоне достаточно точно отражает тепловые процессы, протекающие в УПП [1].

В расчетных соотношениях предполагается воздействие прямоугольного импульса мощности, в который преобразуются реальные импульсы мощности, причем среднее значение прямоугольного импульса мощности то же, что и реального. Правильность такого преобразования доказана в [1,2]. На рис. 1 приведены мощности потерь и изменение температуры полупроводниковой структуры УПП при различных режимах работы КПА.

Допустимая мощность потерь полупроводниковой структуры в продолжительном режиме:

$$P_{T макс} = \frac{T_{j макс} - T_a}{R_{(th)}}, \tag{1}$$

где $T_{j макс}$ - максимально допустимая температура полупроводниковой структуры;
 T_a - температура окружающей среды;

$R_{(th)}$ - установившееся тепловое сопротивление УПП с типовым охладителем при принятой в КПА системе охлаждения.

Допустимая мощность потерь в продолжительном режиме с последующей перегрузкой

$$P_{T(II)макс} = \frac{T_{jмакс} - T_a - P_T R_{(th)}}{Z_{(th)t_n}} + P_T, \quad (2)$$

где $Z_{(th)t_n}$ - переходное сопротивление переход - охлаждающая среда в конце перегрузки.

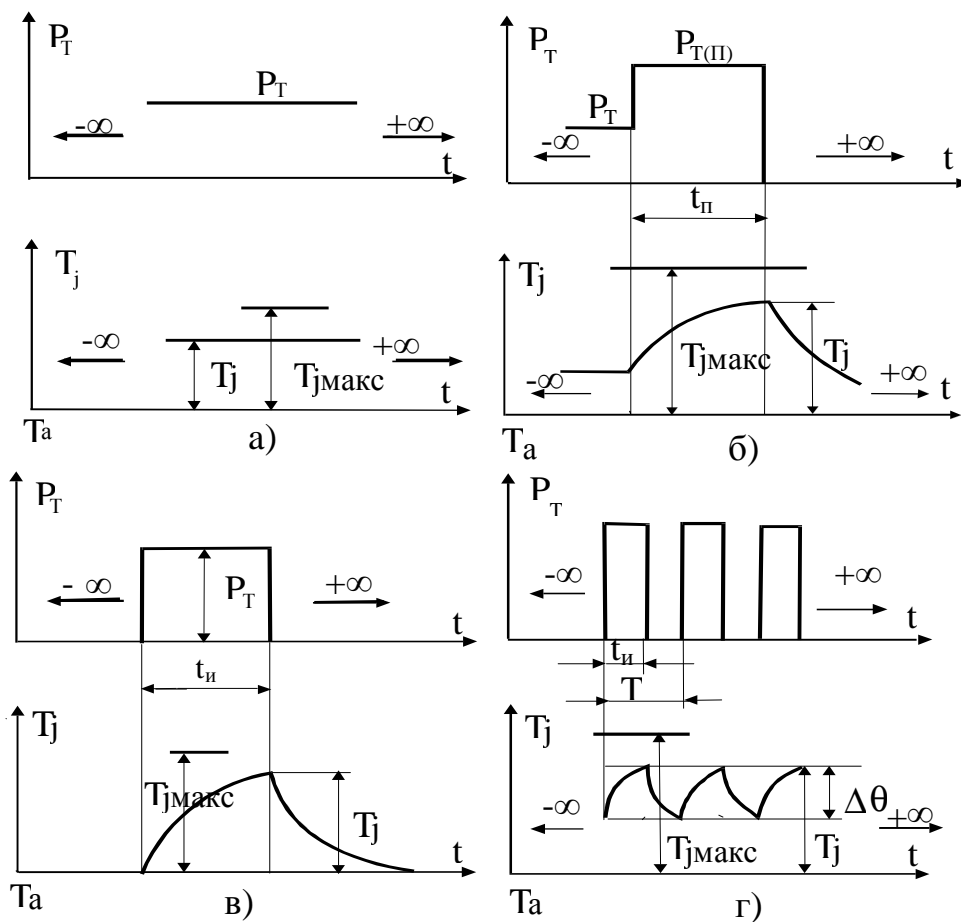


Рис. 1. Мощность потерь и изменение температуры (перехода)УПП при различных режимах работы КПА: а)продолжительный; б)продолжительный с последующей перегрузкой; в) кратковременный; г)повторно-кратковременный.

Допустимая мощность потерь в кратковременном режиме

$$P_{Tмакс} = \frac{T_{jмакс} - T_a}{Z_{(th)t_n}}, \quad (3)$$

где $Z_{(th)t_u}$ - тепловое сопротивление переход - охлаждающая среда УПП в конце импульса длительностью t_u , определяемое по графическим или аналитическим зависимостям переходного теплового сопротивления (при системе охлаждения, принятой в КПА) от времени [2].

Работа КПА в повторно-кратковременном режиме возможна при различных частотах включения $n = \frac{1}{T}$ и различных продолжительностях включения $ПВ = \frac{t_u}{T}$, при этом допустимая мощность потерь определяется по формуле [2]

$$P_{T, макс} = \frac{T_{j, макс} - T_a}{\frac{t_u}{T} R_{(th)T} + (1 - \frac{t_u}{T}) Z_{(th)(T+t_u)} - Z_{(th)T} + Z_{(th)t_u}} \quad (4)$$

где t_u - длительность импульса;
 T - длительность одного цикла;
 $Z_{(th)(T+t_u)}$, $Z_{(th)T}$, $Z_{(th)t_u}$ - переходные тепловые сопротивления в соответствующие моменты времени.

Изложение основного материала. Основным источником нагрева полупроводниковой структуры УПП являются потери в состоянии прямой проводимости [1].

В полупроводниковом ключе (ПК) переменного тока

$$P = I_{Tcp} U_0 + (k_\phi I_{Tcp})^2 \cdot R_\delta, \quad (5)$$

в ПК постоянного тока

$$P = I U_0 + I^2 \cdot R_\delta, \quad (6)$$

где $k_{\text{тм}} = \frac{I_T}{I_{Tcp}}$ - коэффициент формы, который определяется в зависимости от типа ПК;

I_T - действующее значение тока через УПП;

I_{Tcp} - среднее значение тока через УПП;

I - ток, протекающий в цепи ПК постоянного тока.

Подставив (5, 6) в (1 - 4), получим уравнения для определения допустимого среднего тока УПП при различных режимах работы.

В продолжительном режиме:

а) для переменного тока

$$I_{Tcp}^2 k_\phi^2 R_\delta + I_{Tcp} U_0 - \frac{T_{j, макс} - T_a}{R_{(th)}} = 0 ; \quad (7)$$

б) для постоянного тока

$$I^2 R_\delta + I U_0 - \frac{T_{j, макс} - T_a}{R_{(th)}} = 0 . \quad (8)$$

В продолжительном режиме с последующей перегрузкой:

а) для переменного тока

$$I_{Tcp}^2 k_{\phi}^2 R_{\delta} + I_{Tcp} U_0 - \frac{T_{j, макс} - T_a - P_T R_{(th)}}{Z_{(th)t_n}} - P_T = 0; \quad (9)$$

б) для постоянного тока

$$I^2 R_{\delta} + I U_0 - \frac{T_{j, макс} - T_a - P_T R_{(th)}}{Z_{(th)t_n}} - P_T = 0. \quad (10)$$

В кратковременном режиме:

а) для переменного тока

$$I_{Tcp}^2 k_{\phi}^2 R_{\delta} + I_{Tcp} U_0 - \frac{T_{j, макс} - T_a}{Z_{(th)t_u}} = 0; \quad (11)$$

б) для постоянного тока

$$I^2 R_{\delta} + I U_0 - \frac{T_{j, макс} - T_a}{Z_{(th)t_u}} = 0. \quad (12)$$

В повторно-кратковременном режиме:

а) для переменного тока

$$I_{Tcp}^2 k_{\phi}^2 R_{\delta} + I_{Tcp} U_0 - \frac{T_{j, макс} - T_a}{\frac{t_u}{T} R_{(th)T} + (1 - \frac{t_u}{T}) Z_{(th)(T+t_u)} + Z_{(th)t_u} - Z_{(th)T}} = 0; \quad (13)$$

б) для постоянного тока

$$I^2 R_{\delta} + I U_0 - \frac{T_{j, макс} - T_a}{\frac{t_u}{T} R_{(th)} + (1 - \frac{t_u}{T}) Z_{(th)(T+t_u)} + Z_{(th)t_u} - Z_{(th)T}} = 0. \quad (14)$$

При этом допустимое значение эффективного тока в одном полюсе ПК:

а) для переменного тока в случае двух встречно-параллельно включенных УПП

$$I_{\text{эф}} = I_{Tcp} k_{\phi} \sqrt{2}; \quad (15)$$

б) для постоянного тока

$$I_{\text{эф}} = I. \quad (16)$$

На основании полученных уравнений определяются номинальный ток и номинальный рабочий ток КПА, величина перепада температуры полупроводниковой структуры (ΔT), а также строится перегрузочная характеристика аппарата по току ($t_n = f(\frac{I}{I_{ном}}$)), с помощью которой находится максимально допустимое время перегрузки.

Номинальный ток характеризует работу КПА в продолжительном режиме, номинальный рабочий ток - в повторно-кратковременном режиме. В последнем случае в качестве нагрузки аппарата, как правило, выступает электрический двигатель, пусковой ток которого в несколько раз превышает номинальный.

Ток КПА:

- номинальный

$$I_{ном} = k_3 I_{эф}, \quad (17)$$

где $k_3 = k_n k_n$ - коэффициент запаса;

k_n - коэффициент надежности, значение которого рекомендуется принять равным 0,85 [1];

k_n - коэффициент, учитывающий меру снижения тока $I_{эф}$ в связи с возможностью длительной работы аппарата при пограничном токе ($I_{ногр}$) срабатывания максимально токовой защиты ($I_{ногр} \approx 1,3 I_{ном}$).

Опыт эксплуатации гибридных и бесконтактных полупроводниковых аппаратов защиты и управления показал, что наиболее приемлемые значения k_3 заключены в диапазоне (0,55 - 0,60) [1];

- номинальный рабочий

$$I_{номр} = \frac{k_3 \cdot I_{эфПВ}}{\kappa}, \quad (18)$$

где $I_{эфПВ}$ - допустимое значение эффективного тока одного полюса ПК в повторно-кратковременном режиме;

κ - краткость пускового тока двигателя ($\kappa = 6$ - для переменного тока и $\kappa = 2,5$ - для постоянного тока).

Величина максимального перепада температуры полупроводниковой структуры (ΔT) характеризует надежность УПП при циклической нагрузке и определяется при повторно-кратковременном режиме на основании следующих выражений:

а) для переменного тока

$$\Delta T = [\kappa I_{Тср} (U_0 + k_\phi \kappa I_{Тср} R_\delta)] \cdot Z_{(th)t_u}, \quad (19)$$

б) для постоянного тока

$$\Delta T = \kappa I_{номр} (U_0 + \kappa I_{номр} R_\delta) \cdot Z_{(th)t_u}, \quad (20)$$

где $I_{Тср} = \frac{I_{номр}}{k_\phi \sqrt{2}}$ - средний ток УПП, соответствующий номинальному рабочему току;

$Z_{(th)t}$ - тепловое сопротивление переход - окружающая среда в конце импульса, длительность которого определяется из выражения

$$t_u = \frac{T}{\kappa^2}.$$

Зная величину ΔT можно найти среднюю циклоустойкость УПП полупроводниковых аппаратов, работающих в повторно-кратковременном режиме.

Циклоустойкость определяется усталостным характером остаточных механических напряжений при периодическом нагреве выпрямительного элемента УПП и рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$N = A \cdot \Delta T^{-a},$$

где A и a – постоянные, учитывающие конструктивные особенности УПП. Значения этих постоянных для наиболее распространенных УПП приведены в [1,3].

Перегрузочная характеристика ПА по току $t_n = f\left(\frac{I}{I_{ном}}\right)$ строится по уравнениям (9) и (11) или (10) и (12) в зависимости от рода тока аппарата. С помощью этих уравнений для заданного значения времени t_n находится допустимое значение эффективного тока $I_{эф}$ одного полюса ПА, работающего либо в кратковременном режиме (уравнения (11) и (12)), либо в продолжительном с последующей перегрузкой (уравнения (9) и (10)). Затем находится

$$I = k_{з1} I_{эф},$$

где $k_{з1} = k_n = 0,85$ - коэффициент запаса в этом режиме работы.

Очевидно, что защитная времятоковая характеристика ПА, должна проходить всегда ниже этой зависимости.

С целью иллюстрации использования предложенных выше соотношений были рассчитаны с помощью ЭВМ основные элементы силовой части наиболее массовых КПА – бесконтактных полупроводниковых контакторов на номинальные токи от 100 до 630 А и номинальное напряжение 380 В, частотой $f = 50$ Гц. При этом полупроводниковые ключи этих аппаратов выполнялись на базе двух встречно-параллельно включенных тиристоров с типовыми охладителями и естественной системой охлаждения.

Наиболее важные результаты приведены в таблице.

Результаты расчета перегрузочной характеристики контактора по току $t_n = f\left(\frac{I}{I_{ном}}\right)$ на $I_{ном} = 200$ А приведены на графике рис. 2.

Таблица 1 Результаты расчета параметров основных элементов бесконтактных контакторов

Основные параметры контактора		Расчетные параметры			
Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Тип силового тиристора	Класс по напряжению	*Номинальный рабочий ток, А	Пред. коммут. сп-ть, кА
100	380	T133-320	10	80	3,0
160		T153-630		160	
250				200	
400		T253-1000, 2 параллельно		320	9,0
630				400	

Примечание. *Этот параметр рассчитан для частоты включений $n = 1200$ вкл/час и продолжительности включения ПВ = 15 %.

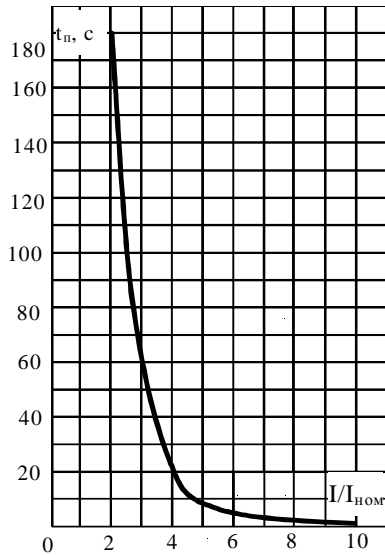


Рис. 2 – Перегрузочная характеристика по току бесконтактного полупроводникового контактора (силовые тиристоры типа Т153-630, $I_{ном}=200$ А)

Выводы. Таким образом, предложенная методика расчета теплового режима УПП силовых коммутационных ПА, работающих в длительном режиме, позволяет определить следующие важнейшие параметры и элементы КПА: номинальный ток, номинальный рабочий ток, типы тиристоров, циклоустойкость этих тиристоров, а также перегрузочную характеристику по току аппарата, необходимую для выбора эффективной максимальной токовой защиты изделия, т.е. практически полностью оценить его технические возможности, а также массогабаритные и стоимостные показатели.

Литература

1. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. Учебник (под ред. А.Г.Соскова). – К: Карвелла, 2005.-344 с.
2. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. 2^е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985, - 400 с.
3. Сосков А.Г., Сосков С.А. Расчет циклоустойкости тиристоров при работе их в составе гибридных полупроводниковых аппаратов переменного тока // Вестник Харьк. гос. политехн. ун-та. Сер.: Новые решения в современных технологиях. - Харьков: ХГПУ, 1999. -Вып. 58. - С. 62 - 63.

РОЗРАХУНКУ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ПОТУЖНИХ КЕРУЄМИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ СИЛОВИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ ПРИ ТРИВАЛІЙ ДІСТРУМОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

А.Г. Сосков, І.О. Соскова, П.Н. Алаєв, Н.О. Рак

Запропонована методика розрахунку, що дозволяє визначити наступні важливі параметри та елементи напівпровідникових апаратів: номінальний струм, номінальний робочий струм, типи тиристорів, циклоустійкість цих тиристорів, а також перевантажувальну спроможність за струмом апарата.

THE METHODS OF CALCULATION OF HEAT REGIME OF POWERFUL GUIDED SEMICONDUCTORS EQUIPMENT OF POWER COMMUTATION DEVICES UNDER LONG EXPOSURE TO CURRENT LOAD

A.G. Soskov, I.A. Soskova, P.N. Alaev, N.O. Rak

The proposed methodology of calculation is allowing to define the following major operation factors and elements of semiconductor devices: nominal current, nominal operation current, sort of thyristors, their cycle stability and reloading ability of a current of the device.